

И. С. Балафендиева, Д. В. Бережной, А. А. Саченков
*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
e_xo@mail.ru, Dmitri.Berezhnoi@ksu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТА В ЗОНЕ ОПОРЫ МОСТА

Целью работы являются теоретические исследования и проведение расчетов по определению несущей способности опоры моста с учетом ее взаимодействия с окружающим грунтовым массивом. В целом массив пород в зоне опоры имеет достаточно сложное структурно-тектоническое строение. Отмечается крупное тектоническое нарушение, которое унаследовала палеодолина реки. Проектируемая и существующая опоры мостового перехода находятся прямо на борту этого нарушения, осложненного многочисленными трещинами (бортового отпора, напластования, карстообразования). В основании этой опоры расположен ряд карстовых полостей, заполненных продуктами выщелачивания и суффозионного выноса из перекрывающих отложений.

Площадка опоры находится в исключительно сложных инженерно-геологических условиях и требует проведения дополнительного и более тщательного анализа несущей способности опоры совместно с окружающим грунтовым массивом при учете возможных противокарстовых мероприятий. Целью данных исследований является решение вопроса о целесообразности проведения работ по укреплению грунтов в районе опоры.

Грунты в зоне опоры являются физически нелинейными средами и подчиняются закону Гука в небольшом диапазоне

прикладываемых нагрузок. Существуют многочисленные математические модели [1] – [4], позволяющие описать процесс их деформирования, которые различаются сложностью разрешающих уравнений. В настоящей работе используется модель, аналогичная модели идеально пластического тела. В соответствии с ней предполагается, что до предельного состояния справедлив закон Гука, а после его достижения среда начинает деформироваться без увеличения воспринимаемой нагрузки, что приводит к перераспределению напряжений во всем объеме. Построение вычислительного алгоритма основано на дискретизации расчетной области в рамках конечно-элементной методики [5] – [8]. Рассчитываемую опору и прилегающий к ней грунт можно представить как трехмерный массив, обладающий специфическими свойствами.

Грунты, в которых размещаются исследуемые опоры, представляют собой “слоеный пирог” из песков, глин, суглинков, известняка, песчаника и т. д. Для песков и глин предельное состояние хорошо описывается условием прочности Мизеса – Боткина [5].

Вычислительный алгоритм строится с помощью итерационной процедуры типа “метода начальных напряжений”. Первое приближение определяется из решения вариационного уравнения принципа виртуальных перемещений в предположении справедливости закона Гука. В дальнейшем предполагается, что кинематические связи между фрагментами (условия непрерывности перемещений) и кинематические граничные условия выполняются априори. Уравнения равновесия для каждого фрагмента, статические условия сопряжения и статические граничные условия выполняются автоматически в интегральном смысле.

Расчеты проводились с использованием трехмерных линейных 8-узловых конечных элементов сплошной среды, узловыми неизвестными которого являются проекции вектора перемещений на координатные оси рабочей плоскости. В некоторых случаях для сохранения приемлемой для расчета формы конечных элементов вместо восьмиугольных искривленных параллелепипедов используются искривленные треугольные призмы и тетраэдры.

По середине грунтового массива расположена опора, основание которой представляют 16 цилиндрических свай, расположенных в шахматном порядке. Над сваями расположен трехмерный блок, моделирующий основание опоры. Этот блок считается практически не деформируемым, так как через него передается нагрузка от веса опоры и пролетной части моста (с учетом подвижной нагрузки). Под основанием опоры моделируются 3 карстовые полости: верхняя имеет форму параллелепипеда, две другие — форму усеченных конусов.

Расчеты проводились с учетом этапности нагружения. На первом этапе вычислений прикладывается нагрузка от собственного веса грунта и расположенных в нем цилиндрических свай опоры. На втором этапе к трехмерному блоку, расположенному над цилиндрическими сваями, прикладываются нагрузки от веса опоры, пролета моста и подвижной нагрузки. В случае расчета, реализующего моделирование надвижки пролета моста, принимается третий этап нагружения, включающий и действие момента от возникающей силы трения, и приложенного к трехмерному блоку, расположенному над цилиндрическими сваями.

Анализ результатов выполненных расчетов позволяет сделать вывод о том, что основными опасными факторами, опре-

деляющими несущую способность опоры мостового перехода, являются: наличие карстовых полостей, расположенных в грунтовом массиве под указанной опорой; место посадки опоры на борту палеодолины реки.

Для защиты опоры от негативного воздействия активно развивающегося сульфатно-карбонатного карста и обеспечения эксплуатационной надежности мостового перехода возможно инъекционное укрепление карстующихся грунтов в основании опоры методом струйной цементации. Результаты выполненных расчетов показывают прочностную эффективность выбранного решения. Вместе с тем, наличие закрепления в рассматриваемых условиях грунтового массива в окрестности опоры не может гарантировать надежного результата и оставляет большую степень неопределенности как с точки зрения требуемой геометрии областей закрепления, так и требуемой конечной прочности закрепленных грунтов.

На основании вышеописанного можно однозначно сделать вывод о необходимости переноса опоры мостового перехода через реку в место, характеризующееся отсутствием карстовых полостей, расположенных под опорой, и расположенное вдали от борта палеодолины реки. Предложенная авторами методика расчета позволяет эффективно решать трехмерные задачи пластического деформирования грунтовых массивов, взаимодействующих с расположенными в них конструкциями, в условиях сложного силового нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарецкий Ю. К. *Лекции по современной механике грунтов*. – Ростов: РГУ, 1989. – 607 с.
2. Николаевский В. Н. *Геомеханика и флюидодинамика*. – М.: Недра, 1996. – 448 с.

3. Николаевский В. Н. *Механика пористых и трещиноватых сред*. – М.: Недра, 1984. – 232 с.

4. Фадеев А. Б. *Метод конечных элементов в геомеханике*. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

5. Голованов А. И., Бережной Д. В. *Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел*. – Казань: Изд-во "Дас", 2001. – 300 с.

6. Секаева Л. Р., Бережной Д. В., Коноплев Ю. Г. *Исследование взаимодействия деформируемых конструкций с суглинками и водонасыщенными грунтами // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов. Труды XX межд. конф.* – СПб, 2001. – Т. III. – С. 156-159.

7. Бережной Д. В., Голованов А. И., Паймушин В. Н., Пискунов А. А. *Проблемы прочности и пластичности*. – Н. Новгород, 2001. – Вып. 63. – С. 170-179.

8. Бережной Д. В., Голованов А. И., Паймушин В. Н., Сидоров И. Н., Клементьев Г. А. *Исследование напряженно-деформированного и предельного состояния сухих и водонасыщенных грунтов // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов". Труды XIX межд. конф.* – СПб, 2001. – Т. II. – С. 82-86.